

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ имени П.П.ШИРШОВА

На правах рукописи

УДК 551.465.62

ПИТЕРБАРТ ЛЕОНИД ИЛЬИЧ

ДИНАМИКА И ПРОГНОЗ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА (СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД)

(11.00.08 - океанология)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Институте океанологии
им.П.П. Ширшова АН СССР

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Г.И.Баренблатт,
доктор физико-математических наук В.А.Рожков,
доктор физико-математических наук А.М.Яглом

Ведущая организация: Морской гидрофизический институт
АН УССР

Защита состоится "16" марта 1988 года в 14 час.
на заседании Специализированного совета по присуждению ученой
степени доктора наук Д 002.86.01 при Институте океанологии
им.П.П.Ширшова А.

Адрес Ин

С диссе
океанологии

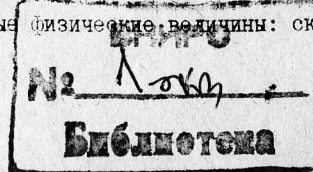
Автореферат

Ученый секре
кандидат гес

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Верхний квазиоднородный слой (ВКС) океана является важнейшим элементом климатической системы, благодаря той роли в обмене энергией, массой и теплом между океаном и атмосферой, которая принадлежит происходящим в ВКС процессам. Исследование несезонной изменчивости температуры поверхности океана представляется, таким образом, весьма важным с точки зрения таких фундаментальных научных задач, как климатообразующая роль океана и общая проблема взаимодействия океана и атмосферы. Изучение аномалий температуры поверхности океана (АТПО) актуально также и с точки зрения практических задач. Здесь прежде всего следует отметить проблему прогноза среднемесячных значений АТПО, которая важна для нужд рыболовства и мореплавания и решение которой было бы полезно для дальнейшего продвижения в вопросе долгосрочного прогноза погоды. Поэтому за последние годы интерес к исследованию АТПО значительно возрос. Немаловажную роль в интенсификации изучения явления сыграла также широкая публикация в нашей стране и за рубежом данных многолетних попутных судовых измерений температуры поверхности океана и ряда атмосферных параметров. Это в первую очередь стимулировало статистические методы исследования аномалий, так как достаточно длинные ряды наблюдений (20-30 лет) дали подходящую основу для построения и проверки вероятностных моделей АТПО. Однако в большинстве работ такого сорта применение методов статистического анализа носило в известной мере формальный характер из-за трудностей обоснования моделей и интерпретации оценок их параметров. Поэтому в число первоочередных выдвинулась задача вывода статистических моделей из уравнений гидротермодинамики и пересчета параметров модели в конкретные физические величины: скорости, коэффициенты обме-



на и т.д. Основой для такого подхода к построению статистических моделей послужила концепция простых стохастических моделей климата Хассельмана (1976). С точки зрения применения математического аппарата эта концепция подразумевает использование стохастических дифференциальных уравнений для описания изменчивости температуры в ВКС в качестве альтернативы осредненным (детерминированным) уравнениям. Таким образом, в теоретическом аспекте исследование аномалий ТПО есть задача о распространении тепла в случайной неоднородной нестационарной среде. Такая задача представляет самостоятельный интерес в физике случайных сред (Зельдович и др., 1987). Но главное, что ее решение дает прочный теоретический фундамент для изучения изменчивости АТПО, благодаря чему эмпирический анализ данных дополняется аналитическим описанием процессов генерации, эволюции и затухания аномалий.

Цели и задачи исследования.

Статистический анализ длительных рядов наблюдений температуры поверхности океана и сопутствующих атмосферных параметров (Дэвис, 1976; Элсберри и Камп, 1978), а также теоретические исследования (Хассельман и Франкинъял, 1976) показали, что одной из главных и повсеместных причин долгопериодных (больше месяца) флуктуаций температуры верхнего слоя океана в средних широтах служат синоптические атмосферные процессы. С учетом наличия разномасштабных по времени и пространству компонент в рассматриваемой системе океан-атмосфера целесообразно использовать вероятностный подход к исследованию поля АТПО. Созданные к настоящему времени массивы наблюдений ТПО, температуры и влажности воздуха, скорости ветра дают возможность строить статистические модели на базе натурных данных. Наконец, современные методы тео-

рии случайных процессов позволяют при определенных условиях строго решать проблему замыкания уравнения для среднего поля температуры и уравнений для статистических моментов ее флуктуаций.

Физически и экспериментально обоснованная идея о генерации АТПО короткопериодными атмосферными процессами, накопленные длительные ряды наблюдений и последние достижения теории случайных процессов и полей составляют в совокупности основу предпринятого в настоящей работе исследования процессов генерации, эволюции и затухания АТПО.

Главная цель такого исследования заключается в достижении физического понимания проблемы предсказания АТПО, получении количественных оценок вкладов различных факторов, участвующих в формировании аномалий, и аналитическом описании закономерностей генерации и диссипации индивидуальных аномалий. Без такой базы построение конкретных прогностических алгоритмов невозможно. Цель работы, таким образом, находится в общем русле задач исследования изменчивости процессов в океане и атмосфере в их взаимосвязи, поставленных программой "Разрезы".

Из сформулированной цели вытекают следующие задачи:

- развитие основы аналитического исследования АТПО посредством строгого вывода уравнений для среднего поля температуры и статистических моментов ее флуктуаций, определение границ применимости этих уравнений;
- построение и проверка статистических моделей полей АТПО в средних широтах Северного полушария, исходя из уравнения теплового баланса для аномалий;
- выяснение физического смысла статистической предсказуемости АТПО и оценка реальных возможностей статистического прог-

ноза;

- количественная оценка роли адвекции, инерции и внешних атмосферных факторов в изменчивости АТПО, выяснение сезонных особенностей формирования аномалий;
- теоретическое описание процессов генерации, эволюции и затухания крупномасштабных пространственных аномалий и аномальных градиентов ТПО.

Основные результаты, научные выводы и их новизна.

Сформулированные задачи потребовали развития новых методов исследования, основанных на глубоких современных достижениях теории случайных процессов и полей. Три первых из перечисленных ниже главных результатов работы следуют в этом направлении.

1. С помощью синтеза лагранжева подхода и методов теории случайного блуждания получены замкнутые уравнения для среднего поля ТПО, осредненных аномалий ТПО, корреляционной функции и старших моментов флуктуаций температуры при наличии случайных флуктуаций поля скорости, потоков тепла и толщины ВКС.

2. Показано, что дискретные по времени и пространству отсчеты отклика линейной динамической системы (ЛДС) на распределенный в пространстве белый шум описываются моделью многомерной авторегрессии. Даются формулы, связывающие параметры системы и коэффициенты регрессии.

3. Установлено, что функцию Грина ЛДС можно восстановить по отклику на распределенный белый шум с неизвестной пространственной корреляционной структурой.

Развитый аналитический аппарат (пп. 1-3) позволил решить следующие конкретные задачи.

4. Установить явную аналитическую зависимость ошибки статистического прогноза АТПО от относительной доли короткопериод-

ных (т.е. имеющих характерное время изменчивости порядка синоптического масштаба в атмосфере) процессов в формировании АТПО, характеристик точности и дискретности измерений температуры, что позволило оценить минимально возможную ошибку прогноза и определить пути его улучшения.

5. Дать количественные оценки роли различных факторов (аномалии тепловых потоков на границе океан-атмосфера, перенос климатических градиентов температуры аномальными течениями, адвекция, инерция, турбулентное вовлечение нижележащих вод) в формировании поля АТПО.

6. Построить карты адвекции аномалий температуры поверхности океана в северных частях Тихого и Атлантического океанов.

7. На основе теоретических моделей установить связь между средними характеристиками аномалий (время жизни, занимаемая площадь, время между появлением двух аномалий и т.д.) и климатическими параметрами среды (фактор обратной связи, коэффициент горизонтального обмена, дисперсия и пространственный масштаб атмосферных воздействий) в стационарном и нестационарном режимах.

8. Разработать методы оценки характеристик поля скорости на поверхности океана по наблюдениям поля ТПО или некоторого пассивного трассера.

Следующие ниже выводы 1-3 основаны на многомерных авторегрессионных моделях АТПО, построенных по натурным данным, а выводы 4-8 являются результатом теоретического анализа с использованием статистических оценок параметров уравнений теплового баланса.

1. Потенциально возможная ошибка статистического прогноза АТПО на месяц вперед, соответствующая абсолютной точности изме-

рений и высокому пространственному разрешению, совпадает с относительной долей короткопериодных процессов в формировании АТПО (флуктуации тепловых потоков на поверхности и нижней границе ВКС, перенос аномальными течениями климатических и фронтальных градиентов) и колеблется в пределах от 20 до 50% (Северная Атлантика). Реальная ошибка прогноза (с учетом погрешности данных измерений) составляет 40–70%.

2. В северных частях Тихого и Атлантического океанов перенос АТПО происходит в основном в соответствии с крупномасштабной циркуляцией поверхностных вод за исключением зон западных пограничных течений, где аномальное тепло рассеивается посредством меандрирования течений и отделения от них рингов. На примере зоны Куроисио показано, что вклад процессов синоптического масштаба в перенос АТПО достигает 60%.

3. Значение коэффициента крупномасштабного горизонтального обмена теплом для Северной Атлантики имеет порядок $10^8 \text{ см}^2/\text{с}$.

4. Относительно слабые синоптические атмосферные процессы могут служить причиной образования длительных аномалий ТПО, охватывающих обширные акватории (порядка 1 млн. кв. км) и существенно превышающих норму (на одно стандартное отклонение).

5. Нелинейная зависимость скорости вовлечения нижележащих вод и скорости поступления тепла из атмосферы от толщины ВКС с учетом стохастического характера короткопериодных колебаний тепловых потоков на верхней и нижней границе ВКС приводит к повышенной вероятности образования аномалий осенью и к повышенной вероятности образования особенно резких аномалий весной.

6. Стадия генерации аномалий характеризуется линейным ростом дисперсии флуктуаций температуры и экспоненциальным убыванием пространственного масштаба корреляции, что может служить

одним из возможных объяснений многомасштабности поля АТПО (Дэвис, 1976).

7. Время жизни аномалии при отсутствии источника пропорционально квадрату логарифма отношения квадратов линейного размера аномалии и радиуса корреляции поля скорости, умноженного на число Пекле. Тем самым дается качественно правильная зависимость длительности существования аномалий от их размеров.

8. Если пространственный масштаб корреляции неоднородностей температуры, умноженный на число Пекле, больше соответствующего масштаба флуктуаций поля скорости, то в течение длительного времени средний квадрат флуктуаций градиента температуры поверхности океана экспоненциально растет.

Результаты диссертации являются оригинальными, а выводы 1, 4, 6, 7, 8 получены впервые. Выводы 2, 3, 5 к которым автор пришел в результате рассмотрения теоретических моделей или путем строгого статистического анализа данных наблюдений, встречались ранее в виде гипотез или как результат эмпирического анализа данных (Корт, Дуванин, 1968; Адем, 1970; Элсберри и др., 1978; Нестеров, 1981, 1984; Ломакин, 1984).

Обоснованность научных положений и выводов.

В целом реферируемая работа представляет собой комплексное исследование, использующее теоретические методы, статистический анализ данных наблюдений и элементы численного моделирования.

Теоретические исследования основаны на анализе уравнения крупномасштабного теплового баланса с учетом того, что входящие в него гидрофизические поля (скорость течения в океане, тепловые потоки на границе раздела вода–воздух, толщина ВКС и т.д.) содержат случайную компоненту. Поскольку в данной работе вывод и анализ уравнений для среднего поля температуры и статистический

ких моментов ее флуктуаций проведен в основном на уровне строгости, близком к математическому, то обоснованность такого подхода определяется в первую очередь степенью достоверности тех физических гипотез и предположений, которые лежат в основе используемого уравнения теплового баланса, параметризации его членов и допущений относительно статистических свойств входящих в него полей. Поэтому в начале работы дается подробное обоснование главных допущений такого рода: ведущей роли атмосферы в процессах взаимодействия с верхним слоем океана на рассматриваемых временных масштабах и временной короткокоррелированности флуктуационных атмосферных процессов по отношению к аномальным термическим процессам в верхнем слое океана.

Эти же предположения лежат в основе статистических моделей полей АТПО средних широт Северного полушария, построенных по данным наблюдений. Эти модели получены из уравнения теплового баланса с помощью общего утверждения, данного в строгой математической формулировке, о связи линейных динамических систем с непрерывным временем с многомерными моделями авторегрессии. Такой способ построения статистической модели позволяет обойтись без ее проверки на экзаменационной выборке, которую неоткуда взять при исследовании крупномасштабных геофизических процессов. В этом состоит важное методическое значение предложенного способа построения статистических моделей.

Ряд теоретических выводов работы подтверждается данными наблюдений.

В целом отмеченные методические принципы, последовательно выдержанные при обосновании теоретических и статистических моделей, позволяют говорить о достаточно высокой степени достоверности полученных здесь результатов.

Практическая значимость работы.

Анализ статистической предсказуемости полей АТПО в северных частях Атлантического и Тихого океанов дал реальные оценки возможностей статистического прогноза аномалий в этих районах. Результаты о связи динамического и статистического прогнозов указывают также на то, что найденная граница предсказуемости является также пределом для динамического прогноза. Полученные оценки вклада в ошибку прогноза ошибок измерений и интерполяции можно использовать для поиска путей улучшения прогноза. Рассчитанные скорости адвекции аномалий ТПО, прогностические эксперименты в рамках статистической модели функций Грина и количественные оценки вклада различных факторов в формирование АТПО позволяют выявить те области, где статистический прогноз оказывается предпочтительнее прогноза по численным моделям. С другой стороны, статистические оценки некоторых физических параметров (коэффициентов крупномасштабного обмена теплом, фактора обратных связей в системе океан-атмосфера) могут использоваться в численных моделях верхнего слоя океана.

В целом результаты статистического анализа могут служить основой для построения конкретных прогностических алгоритмов, сочетающих в себе численное моделирование, статистический подход и учет экспертных оценок.

Теоретические результаты работы дают непосредственные расчетные формулы для длительности существования пространственной аномалии при заданных климатических значениях параметров среды и начальных данных об аномалии.

Публикация результатов диссертации и личный вклад автора.

По теме диссертации опубликовано 20 научных работ.

Основные результаты неоднократно докладывались на Семинаре

по геофизической гидродинамике при Комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана, научно-консультативном совете по программе "Разрезы" при ГКНТ СССР, 2-ом Всесоюзном симпозиуме "Физические аспекты теории климата" (Обнинск, 1984), I-ом Всемирном конгрессе по теории вероятностей и математической статистике общества Бернулли (Ташкент, 1986), Всесоюзной конференции по прикладным задачам теории вероятностей (Москва, 1987), рабочих совещаниях "Температура поверхности океана" (Светлогорск, 1984) и "Спектры и динамика неупорядоченных систем" (Пушино, 1986), семинарах Гидрометеоцентра, Государственного океанографического института при Госкомгидромете СССР, МГУ и других организаций.

Основные идеи и постановки задач в работах, написанных в соавторстве, принадлежат автору диссертации, и его участие в решении этих задач было существенным на всех этапах исследования.

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Она содержит 230 страниц машинописного текста (без рисунков и литературы), 48 рисунков и список литературы из 168 наименований.

Общая структура диссертации определяется логической связью поставленных научных задач.

Во введении обсуждается актуальность проблемы, формулируются цели и задачи исследования (§ 1). В § 2 уточняются терминология и вводятся основные определения. Аномалии ТПО в реферируемой работе понимаются в традиционном смысле, как отклонения температуры поверхности от годового хода (нормы). Полезно также различать поле АТПО – совокупность отклонений от нормы в точках некоторой географической сетки и когерентные в пространст-

ве термические образования, занимающие обширные площади (порядка 1 млн. км²) и существенно превышающие норму (на одно стандартное отклонение), которые именуются крупномасштабными пространственными аномалиями (КПА). Далее приводится краткий исторический очерк развития исследований в этой области (§ 3). Дается общая характеристика состояния вопроса к моменту начала работы над диссертацией: несмотря на достаточно богатое физико-географическое описание механизмов генерации АТПО и наличие общих физических гипотез о происхождении долгопериодной несезонной изменчивости ТПО, количественных оценок вклада различных факторов в формирование аномалий и аналитического описания процессов их формирования, эволюции и затухания, по-существу, не было. Физико-географическое описание пространственных и временных масштабов изменчивости АТПО в северных частях Атлантического и Тихого океанов (20° с.ш. – 60° с.ш.) содержится в § 4. Обсуждаются некоторые методологические проблемы применения статистических методов в анализе крупномасштабных геофизических процессов (§ 5). Особое место во введении занимает § 6, в котором обсуждаются физические основы простых стохастических моделей климата, так как эта концепция составляет идейный фундамент настоящего исследования. Приводятся данные натурных наблюдений и численных расчетов, подтверждающие ведущую роль атмосферных процессов на рассматриваемых временных масштабах по отношению к термическим процессам в ВКС и указывающие на то, что синоптические процессы в атмосфере имеют характер белого шума на периодах больше месяца. Тем самым показано, что с теоретической точки зрения задача исследования ТПО есть задача о распространении тепла в случайной среде с заданными полями скорости и распределенных источников, время корреляции которых мало по сравнению с временным масшта-

бом изменчивости температуры.

Глава I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В СЛУЧАЙНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СРЕДЕ.

Исходным служит уравнение для осредненных значений температуры $T(t, x)$, где x — точка в евклидовом пространстве E^v размерности $v = 1, 2, 3$.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = \varepsilon \nabla^2 T + \varepsilon - \lambda T \quad (I)$$

Здесь $u = u(t, x)$, $\varepsilon = \varepsilon(t, x)$, $\lambda = \lambda(t, x)$ — заданные, меняющиеся по времени случайные поля скорости, распределенных источников и фактора обратных связей соответственно, ε — эффективный постоянный коэффициент теплопроводности, параметризующий перемешивание, обусловленное мелкомасштабными процессами. В реальных задачах последний член в уравнении (I) возникает при использовании аэродинамических формул для внешних тепловых потоков ($v = 1, 2$). При $v = 3$ полагаем $\lambda \equiv 0$.

Основное допущение состоит в том, что

$$\begin{aligned} \langle u'_i(t, x) u'_j(s, y) \rangle &= \tau_0 \delta(t-s) B_{ij}(x, y), \\ \langle \varepsilon'(t, x) \varepsilon'(s, y) \rangle &= \tau_0 \delta(t-s) B_\varepsilon(x, y), \\ \langle \lambda'(t, x) \lambda'(s, y) \rangle &= \tau_0 \delta(t-s) B_\lambda(x, y), \end{aligned} \quad (2)$$

где δ — δ -функция Дирака, τ_0 — характерный масштаб медленного времени, $B_{ij}(x, y)$ — пространственный корреляционный тензор поля скорости, $B_\varepsilon(x, y)$, $B_\lambda(x, y)$ — пространственные корреляционные функции соответствующих скалярных полей.

Со времени классической работы Тейлора (1921) сложилось представление, что влияние флуктуаций течений на передачу тепла

может быть описано введением эффективной (турбулентной) теплопроводности. Однако до настоящего времени границы применимости такого представления оказывались неясными.

Методы современной теории случайных процессов позволяют по-новому подойти к выводу уравнений, описывающих поведение температуры в случайном поле скорости. Используемый подход представляет собой синтез обычного лагранжева подхода и описания (обычной) теплопроводности на языке случайного блуждания (винеровского процесса), подобно тому как это делается в теории броуновского движения или гидромагнитного динамо (Молчанов, Рузмайкин, Соколов, 1985). В результате применения упомянутой процедуры осреднения приходим к следующему уравнению для среднего поля (31):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + (\langle u \rangle - \tau_0 \langle \lambda' u' \rangle) \cdot \nabla \langle T \rangle &= \nabla \cdot \underline{K} \nabla \langle T \rangle + \langle \varepsilon \rangle - \\ &- (\langle \lambda' \varepsilon' \rangle + \langle u' \cdot \nabla \varepsilon' \rangle) \tau_0 / 2 + (\tau_0 \langle \nabla \lambda' \cdot u' \rangle) / 2 - \\ &- \langle \lambda \rangle - \tau_0 \langle \lambda'^2 \rangle / 2 \langle T \rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\underline{K} = (K_{ij})$,

$$K_{ij} = \delta_{ij} \varepsilon + \tau_0 B_{ij}(x, x), \quad (4)$$

угловые скобки означают осреднение по ансамблю.

Выражение (4) для эффективного коэффициента диффузии тепла известно со времени пикированной работы Тейлора, однако, как следует из (3), традиционная гипотеза замыкания

$$\langle u' T' \rangle = - \underline{K} \nabla \langle T \rangle$$

с помощью которой обычно приходят к формуле (4), оказывается неверной при наличии источника и в случае, например, $\lambda \equiv 0$ вы-

ражение для потока тепла имеет вид

$$\langle u'T' \rangle = -\kappa \nabla \langle T \rangle + \frac{1}{2} \tau_0 \langle u'\varepsilon' \rangle.$$

В § 2 аналогичным образом выводятся уравнения для корреляционной функции и старших разноточечных моментов флуктуаций температуры и ее градиентов. В частности, в случае изотропного бездивергентного поля скорости при отсутствии источника ($\varepsilon \equiv 0$, $\lambda \equiv 0$) уравнение для второго момента $R(t, z) = \langle T'(t, x) T'(t, y) \rangle$, $z = |x - y|$ имеет вид

$$\frac{\partial R}{\partial t} + (2\alpha + B_L(0) - B_L(z)) \nabla^2 R - \frac{\partial B_L}{\partial z} \frac{\partial R}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

где $\tau_0^{-1} B_L(z)$ — продольный коррелятор поля скорости, а ∇^2 в данном случае следует понимать как радиальную часть оператора Лапласа. Пусть $d = \sqrt{R_0(z) / \nabla^2 R_0(z)}$ — тейлоровский масштаб корреляции начального поля температуры, а ℓ — аналогично определяемый масштаб корреляции поля скорости. Если коррелятор $B_L(z)$ предполагается гладким в точке $z = 0$ и быстро убывающим при $z \gg \ell$, то в случае $d \ll \ell$, как следует из (5), диффузия случайных температурных пятен целиком обусловлена мелкомасштабными процессами и характеризуется коэффициентом обмена 2α , а в случае $d \gg \ell$ может быть описана путем введения постоянного эффективного коэффициента диффузии $K = 2\alpha + B_L(0)$. Уравнение (5) "сшивает" эти две хорошо известные асимптотики в области $d \sim \ell$, важной для приложений к ТНО.

Далее показано (§ 4), что в случае конечного времени обновления τ поля скорости уравнение для среднего поля является интегральным. Точнее, диффузионный член заменяется интегральным функционалом от поля температуры, в котором интегрирование про-

изводится по окрестности радиуса $\tau \sqrt{\langle u'^2 \rangle}$. Однако на больших временах и при любых числах Пекле это интегральное уравнение эквивалентно стандартному уравнению Фика, используемому обычно в полуэмпирических теориях турбулентности.

В § 5 рассматривается произвольное эргодическое случайное поле скорости (не обязательно мгновенно коррелированное или обновляющееся через конечные промежутки времени). Установлено, что если характерный пространственный масштаб начального поля температуры велик по сравнению с радиусом корреляции поля скорости, то на больших временах, согласованных с начальными размерами температурных пятен, эволюция поля температуры может быть описана детерминированным уравнением теплопроводности. Дается явное выражение для эффективного тензора диффузии через статистические характеристики поля скорости. Оценки скорости сходимости показывают, что время осреднения пропорционально логарифму числа Пекле, что ограничивает использование принципа осреднения для анализа распространения тепла в реальных турбулентных потоках.

§ 6 посвящен разработке методов решения обратной задачи. Предполагается, что поле температуры наблюдается через равные промежутки времени в узлах равномерной сетки на плоскости. Требуется оценить средние характеристики среды: скорость переноса, коэффициент обмена, фактор обратных связей. Поставленная задача решается в ряде частных случаев, важных для приложений. Даются выражения для погрешностей получаемых оценок параметров через погрешности наблюдений поля температуры. В том случае, если конкретный вид оператора, управляющего процессами теплопереноса и теплообмена, неизвестен, предлагается процедура статистического оценивания функции Грина.

Глава 2. ПОСТРОЕНИЕ И ПРОВЕРКА СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АТПО.

В § 1 процедура осреднения, описанная в предыдущей главе, применяется к уравнению теплового баланса в ВКО (Адем, 1970; Краус и Ниллер, 1977). Осреднение при этом понимается как выделение годового хода (нормы). Обоснованием предположения мгновенной коррелированности случайных составляющих полей скорости в океане и тепловых потоков на границе раздела океан-атмосфера служит масштабное соотношение

$$\tau \ll \ell_0 / u_0, \quad (6)$$

где τ — время корреляции синоптических атмосферных процессов (≈ 10 сут.), ℓ_0 — характерный пространственный масштаб исследуемых неоднородностей поля температуры (≈ 1000 км), u_0 — типичное значение флуктуаций скорости в верхнем слое океана (≈ 10 см/с). Неравенство (6) есть следствие различия плотности и кинематической вязкости воды и воздуха.

Масштабные оценки дополнительных членов в уравнении (3), появляющихся в результате строгого применения процедуры осреднения, показывают, что эти члены имеют тот же порядок, что и сопоставимые с ними по размерности традиционные члены $\langle u \rangle$, $\langle \epsilon \rangle$,

$\langle \lambda \rangle$. Эти оценки основаны на стандартной параметризации тепловых потоков и дрейфовых течений, предположении о квазигеострофичности ветра и формуле Шулейкина, связывающей градиенты температуры воздуха и атмосферного давления.

Имеющиеся измерения ТПО, как правило, осреднены по времени и пространству. Для целей обработки экспериментальных данных выводится уравнение для осредненных аномалий, из которого видно, что в адвекции осредненных аномалий принимают участие не только средние течения, но и аномальные течения. Определенную модифика-

цию претерпевают также источник и фактор обратных связей.

В § 2 дана общая схема перехода от линейной динамической системы, возбуждаемой распределенным в пространстве случайным процессом типа белого шума, к многомерной авторегрессионной модели для дискретных по времени и пространству отсчетов исследуемого поля. Даются оценки погрешностей в вычислении матрицы авторегрессии и ковариационной матрицы остатков, обусловленных неточностью данных и необходимостью аппроксимации непрерывных функционалов функционалами на решетке. В § 3 показано, что функцию Грина динамической системы можно оценить, зная отклик системы на белый шум по времени с произвольной (неизвестной) пространственной статистической структурой. Вводятся эффективно оцениваемые функционалы от функции Грина, имеющие в приложении к полю АТПО ясный физико-географический смысл: степень "энергоактивности", функция влияния и другие.

Развитый в предыдущих параграфах подход применяется к построению статистических моделей полей АТПО в Северной Атлантике и северной части Тихого океана (§ 4). В первом случае для этих целей использовался массив данных попутных судовых наблюдений, подготовленный ВНЕПТИМ МДЦ, а во втором — аналогичный массив Намайеса. Оба массива содержат значения температуры в узлах 5-ти градусной сетки, сглаженные по 5-ти градусным трапециям и временному промежутку в один месяц. Ряды первого массива имеют продолжительность 18 лет, а второго — 32 года.

Многомерная авторегрессионная модель поля АТПО в предположении относительно небольших значений скорости ($|u| \leq \ell / \Delta t$, где $\ell \approx 500$ км — пространственный шаг сетки, а $\Delta t = 1$ мес. временной интервал дискретности) и допущении малой изменчивости градиентов скорости ($\Delta t | \partial u_i / \partial x_j | \ll 1$) задается рекуррен-

тными соотношениями

$$T_n(x_0) = \sum_{i=0}^4 a_i T_{n-1}(x_i) + \varepsilon_n(x_0), \quad (7)$$

где $T_n(x) \equiv T(n\Delta t, x)$; x_0 — произвольная фиксированная точка сетки Z_ℓ ; x_1, x_2, x_3, x_4 — соседние с ней западная, южная, восточная и северная точки соответственно, образующие "крест"; $\{\varepsilon_n(x_0)\}$ — последовательность некоррелированных при фиксированном x_0 случайных величин, выражающих атмосферное возмущение в данной точке. Параметры исходного упрощенного уравнения

$$\frac{\partial T'}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla T' = K \nabla^2 T' + \varepsilon' - \lambda T', \quad (8)$$

в котором предполагается, что величины $\bar{u}$, K , λ медленно изменяются во времени и пространстве, следующим образом выражаются через коэффициенты регрессии и корреляции остатков

$$\bar{u}_1 = \frac{\ell}{\Delta t} \cdot \frac{a_3 - a_1}{a}, \quad \bar{u}_2 = \frac{\ell}{\Delta t} \cdot \frac{a_4 - a_2}{a}, \quad a = a_0 + \dots + a_4 \quad (9)$$

$$B_\varepsilon(x, y) = (2E_\varepsilon(0))^{-1} \langle \varepsilon_n(x) \varepsilon_n(y) \rangle, \quad K = \frac{\ell^2 \exp\{-\lambda \Delta t\}}{\pi a \Delta t},$$

$E_\varepsilon(\omega)$ — временной спектр источника.

Таким образом, модель авторегрессии включает в себя оценки пяти коэффициентов регрессии для каждой точки сетки Z_ℓ и оценки корреляций остатков $\langle \varepsilon(x_i) \varepsilon(x_j) \rangle$, $|x_i - x_j| \leq \ell$. Эти оценки затем могут быть пересчитаны в соответствии с формулами (9) в конкретные физические параметры. Отметим, что уравнение (8), вообще говоря, нельзя признать точным следствием исходного уравнения теплового баланса, однако возможность его использования для исследования

поля АТПО неоднократно подтверждалась статистическим путем (Добровольский, 1981; Франкиньюл и Рейнольдс, 1983; Питербург, Островский, 1984). В частности, расчеты показали, что в модели (7) остатки при различных n действительно слабо коррелированы: коэффициент корреляции при сдвиге на единицу оказывался, как правило, меньшим, чем 0,1.

В § 5 адекватность предложенной модели проверяется путем сопоставления обобщенного временного спектра АТПО, полученного

из модели (7), (кривая б), и эмпирического спектра АТПО, вычисленного методом Тьюки для Северной Атлантики (кривая в). Как видно из рис. 1 спектр, полученный из многомерной модели авторегрессии, заметно лучше приближает эмпирическую кривую, нежели спектр, получаемый из локальной модели теплово-

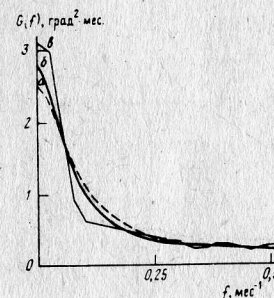


Рис. 1

го баланса Хассельмана-Франкиньюла (1976, кривая а). Это, в первую очередь, относится к области низких частот, играющих важную роль в вопросах предсказуемости АТПО. В § 5 предложены также другие модели временных спектров АТПО, вытекающие из уравнения (8) и показывающие, в частности, что многомерные модели авторегрессии хорошо описывают адвективные процессы в формировании поля АТПО, а сезонная изменчивость крупномасштабных поверхностных течений несущественно влияет на форму спектральных кривых.

Глава 3. ВОЗМОЖНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЛЯ АТПО.

Исследование статистической предсказуемости среднемесячных значений поля АТПО ведется в рамках классического подхода к теории прогноза многомерных случайных стационарных процессов (Винер, Мазани, 1957). Обсуждается, главным образом, случай, когда в качестве исходной информации для прогнозирования аномалий температуры принимаются поля среднемесячных значений АТПО за предыдущие месяцы. Такой выбор предикторов обусловлен тем, что поле АТПО является, по существу, единственным полем, доступным для оперативного наблюдения, благодаря интенсивно развивающимся дистанционным методам исследования поверхности океана. Если процесс описывается многомерной моделью авторегрессии (АР)

$$T'_n = AT'_{n-1} + \varepsilon_n, \quad (10)$$

где T'_n - "вектор" значений поля АТПО в точках географической сетки Z_ℓ , A - матрица авторегрессии, то оптимальный в среднеквадратическом смысле прогноз на один шаг дается формулой $\hat{T}'_n = AT'_{n-1}$, а его ошибка характеризуется ковариационной матрицей остатков $\sum \varepsilon$. Диагональные элементы ϱ_ε^2 матрицы, нормированные дисперсией поля АТПО в соответствующей точке, характеризуют относительную среднеквадратическую ошибку в заданной точке сетки. На рис. 2 дана карта величин ϱ_ε^2 , соответствующих месячному упреждению и рассчитанных для двух сезонов (а - зима, б - лето), по данным для северной части Тихого океана. Сравнение величин ϱ_ε^2 с соответствующими значениями для одномерных АР-моделей показывает, что за счет учета пространственных связей в поле АТПО (в первую очередь адвекции) можно улучшить предсказуемость на 5-10%. Видно также, что зимой предсказуемость заметно

выше, чем летом. Это объясняется тем, что зимой аномалии проникают на большую глубину, в

результате чего возрастает их инерционность. Проведены также расчеты предсказуемости среднемесячных значений АТПО в Северной Атлантике.

Из связи модели (10) с уравнением (8) выводится, что величина ϱ_ε^2 представляется в виде $\varrho_\varepsilon^2 = \varrho_I^2 + \varrho_{cl}^2$, где ϱ_I^2 - относительная доля обусловленного синоптическими атмосферными проце-

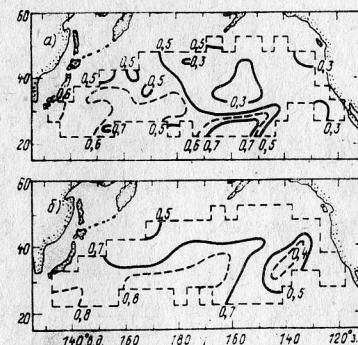


Рис. 2

ссами суммарного источника I' в формировании поля АТПО, а ϱ_{cl}^2 - относительная ошибка, обусловленная погрешностями измерений и интерполяции. Главную часть I' составляет величина

$$Q'/\varrho \bar{h} + u' \cdot \nabla \bar{T} + w_e' \Delta \bar{T} / \bar{h}, \quad (11)$$

где Q' - аномалии суммарного теплового потока на границе раздела океан-атмосфера, $\bar{h}$ - толщина ВКС, $\nabla \bar{T}$ - градиент среднего поля температуры, $w_e, \Delta \bar{T}$ - скорость вовлечения и разность между средней температурой ВКС и температурой на его нижней границе соответственно, черта сверху означает среднее многолетнее значение (норму).

Таким образом, справедлив принцип неопределенности $\varrho_\varepsilon^2 \geq \varrho_I^2$, дающий верхнюю границу предсказуемости поля АТПО. Оценка этой границы с учетом информации о точности используемых данных (Ларин, 1984) показывает, что потенциальная предсказуемость для

некоторых районов Северной Атлантики может достигать 60–80%.

Реальные же значения $1 - \varrho_{\varepsilon}^2$ составляют 30–50%.

В § 2 показано, что динамический прогноз, выполненный по модели (8) в пренебрежении флуктуациями источника ε , дает такую же среднеквадратическую ошибку, что и статистический прогноз по модели (10), а прогнозируемые поля при одинаковых начальных условиях совпадают. Указанный вывод оправдлив в предположении одинаковости пространственных сеток в обоих случаях и идентичности параметров уравнения их статистическим оценкам. Таким образом, устанавливается связь между статистическим и динамическим прогнозом и создается основа для рекомендаций относительно предпочтения одного из двух способов прогнозирования.

В § 3 прогностические эксперименты со статистической оценкой функции Грина, построенной для северной части Тихого океана, дают возможность классифицировать типы распространения тепловых импульсов, выявлять зоны влияния и энергоактивные зоны в поле АТПО, определять области наилучшей предсказуемости, объективно районировать океан по степени взаимообусловленности процессов в поле температуры поверхности.

Глава 4. РОЛЬ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ В ФОРМИРОВАНИИ И ЭВОЛЮЦИИ ПОЛЯ АТПО.

В целях более глубокого понимания проблемы прогноза и создания основы построения конкретных прогностических алгоритмов формальные оценки статистической предсказуемости и раскрытие ее физического содержания должны быть дополнены исследованием роли отдельных факторов в формировании и эволюции поля АТПО.

В § 1 по данным наблюдений за атмосферными параметрами

оценивается дисперсия σ_Q^2 первого слагаемого в сумме (II). Оказывается, что в большинстве районов Северной Атлантики σ_Q^2 составляет существенно больше половины дисперсии остатка σ_{ε}^2 . Таким образом, решающий вклад в источник I' дают флуктуации суммарного теплового потока на границе океан–атмосфера.

В § 2 рассматривается рандомизированный вариант модели ВКСа Крауса–Тэрнера

$$h \frac{\partial T}{\partial t} + w_e \Delta T = Q / \rho c, \quad (12)$$

т.е. предполагается, что функции времени $h, w_e = (\frac{\partial h}{\partial t})^+$, Q являются случайными процессами, для которых эволюция средних описывается соответствующим годовым ходом $(\bar{h}, \bar{w}_e, \bar{Q})$, а флуктуационные составляющие δ – коррелированы. Реально это означает, что время корреляции процессов h', Q' много меньше, чем характерное время существования аномалий (≈ 100 сут). При этом предположении выводятся уравнения для средней температуры $\bar{T}$ и статистических моментов флуктуаций T' . Эти уравнения решались затем при заданных функциях $\bar{h}, \bar{w}_e, \bar{Q}$, определенных

по данным наблюдений на станции Папа, и различных вариантах параметризации дисперсий процессов h', w_e', Q' . На рис. 3 приведены графики годового хода скорости поступления тепла (а, заданная функция), средней температуры воды (б), дисперсии аномалий (в) и эксцесса флукту-

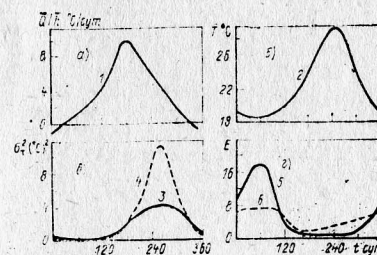


Рис. 3

аций температуры (τ), (рассчитанные функции). Сплошная линия и пунктир отвечают различным способам параметризации дисперсии процессов h' , Q' (в первом случае постоянным считается коэффициент вариации, а во втором – дисперсия). В обоих случаях наблюдается ясно выраженный максимум дисперсии, который в первом случае весьма широк и охватывает период с начала сентября до конца ноября, а во втором случае имеет форму узкого пика, приходящегося на конец сентября. Следовательно, в указанные периоды вероятность превышения процессом T' некоторого фиксированного уровня ($\pm 1^\circ\text{C}$ или $\pm 2^\circ\text{C}$) выше, чем в другие сезоны. Этот вывод согласуется с экспериментальными результатами о том, что наиболее часто аномалии возникают в переходный осенний период, когда перемешанный слой оказывается относительно тонким и теплым, а поэтому сильные атмосферные воздействия в этот период достаточно часто приводят к его разрушению, вызывая значительные отклонения от среднего состояния. Заслуживает внимания максимум эксцесса в весенний период. Как известно, эксцесс служит простейшей мерой перемежаемости – явления, для которого характерно чередование редких, но значительно отклоняющихся от среднего значений исследуемого случайного процесса. Высокий эксцесс указывает также на отклонение распределения от гауссовского. Следовательно, анализ кривых 5 и 6, соответствующих постоянному коэффициенту вариации и постоянной дисперсии h' , w_e , Q' , приводит к выводу о том, что наиболее резкие аномалии (с максимальным отклонением от среднего) возникают чаще всего, по-видимому, весной.

В § 3 проведены расчеты скорости адвекции аномальной температуры по формулам (9) в соответствии с многомерными AP-моделями. Эти расчеты показали, что в северной части Тихого океана и Северной Атлантики перенос АТПО происходит в основном в соот-

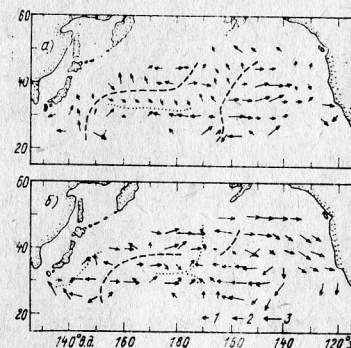


Рис. 4

ветствии с крупномасштабной циркуляцией поверхностных вод (рис. 4, а – холодный б – теплый) за исключением западных пограничных течений, где аномальное тепло рассеивается посредством меандрирования течений и отделения от него рингов. На примере зоны Кюросио дана количественная оценка вклада процессов синоптического масштаба в перенос аномалий ТПО. Отметим некоторую преобладание зон конвергенции и дивергенции АТПО от сезона к сезону (на рис. 4 отмечены точками и пунктиром соответственно). Результаты расчетов адвекции аномалий могут служить ориентиром для выбора между численной и статистической моделью при прогнозировании аномалий. Ясно, что последняя не может дать хороших результатов в районах сильной пространственной изменчивости течений.

Развитые в гл. I теоретические методы решения обратной задачи распространения тепла применяются к оценке орбитальной скорости частиц квазистационарного вихря у южного побережья Греции по серии спутниковых снимков инфракрасного диапазона.

Отмечается также наличие отрицательной корреляции между адвективным членом и слагаемым $\lambda T'$, характеризующим затухание аномалий. Таким образом, крупномасштабная адвекция выступает как механизм генерации АТПО.

Наконец, в § 4 даются статистические оценки параметров λ, K в уравнении (8), характеризующих время жизни аномалий. Параметр

λ рассчитывался как коэффициент регрессии флуктуаций теплового потока на границе раздела вода-воздух, на значения флуктуаций температуры поверхности, а коэффициент горизонтального обмена теплом K находился из последнего соотношения в формулах (9). Величина λ^{-1} оказывалась равной 10–20 мес., а порядок K составил $10^8 \text{ см}^2/\text{с}$. Совпадение последнего значения с масштабными оценками и коэффициентами, используемыми в численных моделях (Адем, 1970) позволяет считать вопрос о порядке K решенным.

Глава 5. ЭВОЛЮЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ АНОМАЛИЙ И АНОМАЛЬНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГРАДИЕНТОВ ТПО.

Данная глава посвящена исследованию процессов генерации и диссипации КПА, т.е. когерентных термических образований, существенно превышающих норму (см. гл. I).

Следует отметить, что по сравнению с главами 2, 3, 4 рассмотрение здесь носит теоретический характер и основывается на уравнениях для статистических моментов поля АТПО. Принимаемые при этом некоторые допущения (однородность, изотропия) с учетом масштабов рассматриваемого явления, строго говоря, неправомерны. Однако качественное описание процессов генерации и затухания, а также масштабные оценки статистических характеристик КПА вполне возможны в рамках упрощающих предположений. С принципиальной стороны вывод и анализ уравнений для статистических моментов в неоднородном случае не представляет труда.

Проведенный в § I анализ уравнений для статистических моментов решения уравнения (I), в котором поля u , ε дополни-

тельно предполагаются однородными и изотропными, а фактор λ полагается постоянным, показывает, что установившееся состояние поля АТПО может быть описано уравнением (8). Решением этого уравнения является статистически однородное статистически стационарное гауссовское поле $T'(t, x)$, задаваемое своим пространственно-временным спектром

$$E_T(\omega, p) = E_\varepsilon(p) (\omega^2 + (\lambda + Kp^2)^2)^{-1}, \quad (I3)$$

где p – волновой вектор, $E_\varepsilon(p)$ – пространственный спектр источника ε .

Стационарный режим поля АТПО, в котором действие источников статистически уравнивается диссипацией, изучается в § 2. Если принять, что $E_\varepsilon(p) \sim (p^2 + \mu^2)^{-2}$, где μ – характерное волновое число атмосферных воздействий, то вычисления, основанные на асимптотической теории выбросов гауссовского однородного поля (Носко, 1969), дают следующие приближенные выражения для среднего времени жизни и средней площади выброса (аномалии) за уровень, равный одному стандартному отклонению,

$$\langle \tau_e \rangle = \lambda^{-1} \varphi_1(x), \quad \langle S_e \rangle = \mu^{-2} \varphi_2(x), \quad (I4)$$

где $x = K\mu^2/\lambda$ – безразмерный параметр,

$$\varphi_1(x) = (1 + x \ln x - x)(x-1)^{-2}, \quad \varphi_2(x) = \frac{1 + x \ln x - x}{x-1 - \ln x}. \quad (I5)$$

Подстановка в (I4), (I5) значений параметров λ , K , оцененных по натурным данным и $\mu^{-1} = 1000 \text{ км}$ дает, что $\langle \tau_e \rangle = 7,5 \text{ мес.}$, $\langle S_e \rangle = 1,7 \cdot 10^6 \text{ км}^2$. Эти оценки показывают, что синоптические атмосферные процессы действительно могут порождать длительные аномалии ТПО, существенно превышающие норму и охватывающие значительные по площади акватории.

Аналогичным способом получены оценки других важных характеристик аномалий: продолжительности времени между наступлением очередных событий, средней площади акватории, покрытой аномалиями. Констатируется, что моменты наступления резких аномалий образуют пуассоновский поток событий, т.е. наступление очередного события не зависит от времени ожидания.

В том же параграфе обсуждается важный методический вопрос о согласованности различных подходов к определению скорости перемещения аномалий.

В § 3 рассматривается ряд нестационарных задач. Показано, что при наличии источника и случайного поля скорости на начальной стадии (когда не учитываются диссипационные факторы) поле температуры характеризуется гауссовскими конечномерными распределениями, линейным ростом по времени дисперсии и экспоненциальным убыванием радиуса корреляции. Эти закономерности позволяют объяснить экспериментальные данные о пространственной многомасштабности поля АТПО (по сравнению с атмосферными полями) и дать модели распределения масштабов аномалий и пространственного спектра АТПО (альтернативного к стационарной модели (I3)).

Далее рассматривается процесс чистого затухания аномалии ($\varepsilon \approx 0$) под воздействием горизонтального обмена теплом. Получена следующая формула для длительности существования аномалии

$$\tau_d = \begin{cases} \frac{e^2}{4K} \ln^2 \frac{d^2 Pe}{e^2}, & Pe^{-1} \ll \frac{d^2}{e^2} \leq 1, \\ \frac{e^2}{4K} \ln^2 Pe + \frac{d^2}{4K}, & d/e \gg 1, \end{cases} \quad (I6)$$

где $Pe = K/\alpha$ - число Пекле, d - линейный размер аномалии, e - радиус пространственной корреляции поля скорости. В случае $d \gg e$ основной вклад в τ_d дает второе слагаемое в (I6) и

получаем хорошо известную традиционную оценку времени жизни аномалии, которая совершенно непригодна при $d \leq e$. В этом случае разумные оценки длительности дает первая часть формулы (I6).

Наиболее простой путь синтезировать эффекты перемешивания, флуктуаций источника и действия обратной связи состоит в численном интегрировании полного уравнения для корреляционной функции поля АТПО

$$\frac{\partial R}{\partial t} + K(z) \nabla^2 R - 2\lambda R = B_\varepsilon(z),$$

где предполагается, что $B_{ij}(z) = \delta_{ij} B_u(z)$;

$$K(z) = \tau_0 (B_u(0) - B_u(z)).$$

Такие вычисления проводились для различных значений λ и различных параметризаций функций $B_\varepsilon(z)$, $B_u(z)$, $R_0(z)$. На рис. 5 дано сравнение эволюции начального пятна для случаев зависимости K от z (вверху) и в случае, когда K постоянно. При этом предполагалось, что $K(\infty) = K = 10^8 \text{ см}^2/\text{с}$.

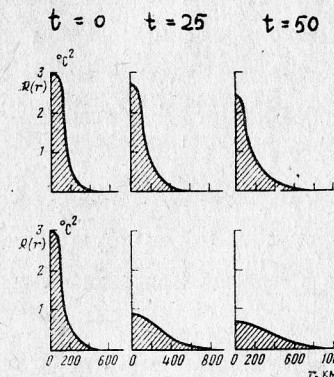


Рис. 5

Как видно из рисунка, если в случае постоянного коэффициента диффузии аномалия через 50 дней перестает существовать, то при учете зависимости K от z температурный контраст через 50 дней уменьшился весьма незначительно. Следует особо обратить внимание на тепловую инертность центра пятна, что связано с тем, что $K(0) = 0$. В

обоих случаях расчет проводился для значения $(2\lambda)^{-1} = 180$ сут.

§ 4 посвящен исследованию аномальных горизонтальных градиентов поля АТПО. Пусть начальное статистически однородное поле температуры характеризуется пространственным масштабом корреляции d_0 . Показано, что если $d_0 > l Pe^{-1/2}$, то в течение промежутка времени длительностью $\tau_* \ln(d_0^2 Pe / l^2)$, где $\tau_* = l^2 / K$, величина среднего квадрата флуктуаций градиента температуры растет экспоненциально с показателем τ_*^{-1} . На временах $t \gg \tau_*$ градиенты затухают как t^{-1} . Это утверждение дает теоретическое объяснение многих экспериментальных наблюдений и может служить основой для формального определения процессов "размешивания" и "смешивания" примеси (Эккарт, 1948). Показано, что на стадии размешивания (роста градиентов) распределение последних характеризуется высокой перемежаемостью. Это свойство принято за основу практического определения зон преобладания процессов размешивания. На основе данных массива Намайеса показано, что северо-западные районы Тихого океана служат зоной, где аномальные течения способствуют обострению крупномасштабных градиентов температуры, в то время как в остальных районах северной части Тихого океана роль аномальных течений либо незначительна, либо же может быть описана введением эффективного коэффициента обмена теплом.

В заключении подводятся итоги исследования, формулируются результаты и выводы, которые в настоящем тексте приведены выше.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

I. Изучение синоптической изменчивости температурного поля в северо-западной части Тихого океана. - Океанология, 1984, №1 (совм. с В.М. Василенко и Д.И. Филипповым).

2. Динамическая стохастическая модель долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана. - ДАН СССР, 1984, т.276, № 6 (совм. с А.Г.Островским).

3. Авторегрессионная модель поля аномалий температуры поверхности воды в Северной Атлантике. - Океанология, 1985, № 3 (совм. с А.Г.Островским).

4. О стохастическом характере генерации крупномасштабных аномалий температуры поверхности океана. - ДАН СССР, 1985, т.282, № 6.

5. Статистическая оценка функции Грина поля температуры поверхности океана. - ДАН СССР, 1985, т.285, № 3 (совм. с С.В.Семовским).

6. Диагноз сезонной изменчивости аномалий температуры поверхности воды в северной части Тихого океана. - Метеорология и гидрология, 1985, № 12 (совм. с А.Г.Островским).

7. Изменчивость поля температуры поверхности океана. - ДАН СССР, 1986, т.286, № 4 (совм. с С.А.Молчановым, А.А.Рузмайкин, Д.Д.Соколовым).

8. Расчет поверхностных течений по полю температуры поверхности океана. - Океанология, 1986, т.ХХVI, № 1.

9. О частотных спектрах аномалий температуры поверхности океана. - Изв. АН СССР, сер.ФАО, 1986, № 3.

10. К вопросу о сезонных особенностях формирования аномалий температуры поверхности океана. - Метеорология и гидрология, 1986, № 6.

11. Об эволюции аномалий температуры поверхности океана. - Тезисы первого всемирного конгресса Общества математической статистики и теории вероятностей им.Бернулли, 1986, т.1 (совм. с Д.Д.Соколовым).

12. О роли аномальных течений в формировании поля температуры поверхности океана. — Океанология, 1986, № 5.

13. О статистической предсказуемости среднемесячных значений температуры поверхности океана. — Изв.АН СССР, сер.ФАО, 1986, № II (совм. с А.Г.Островским).

14. Об адаптации одной численной модели аномалий температуры поверхности океана к натурным данным. — В кн. "Численное моделирование гидрофизических полей и процессов в океане", М., Наука, 1986 (совм. с А.Г.Островским).

15. Формирование особенностей температуры поверхности океана под воздействием синоптических атмосферных процессов. — Изв. АН СССР, сер.ФАО, 1987, № I.

16. Оценка характеристик поля скорости по наблюдениям за пассивной примесью на поверхности океана. — Исследование Земли из космоса, 1987, № I (совм. с К.Н.Федоровым).

17. Турбулентная диффузия градиентов примеси. — ДАН СССР, 1987, т.293, № 5 (совм. с С.А.Молчановым).

18. Анализ процессов в поле температуры поверхности океана с помощью статистической оценки функции Грина. — Морской гидрофизический журнал, 1987, № 2 (совм. с С.В.Семовским).

19. Генерация крупномасштабных аномалий температуры поверхности океана короткопериодными атмосферными процессами. — Изв. АН СССР, сер.ФАО, 1987, № 5 (совм. с С.А.Молчановым и Д.Д.Соколовым).

20. Об аномальных градиентах температуры поверхности океана. Океанология, 1987, № 4.

60x90/16
Печ.л.2,0.

T-12435. Подписано к печати 08.06.1987 г.
Зак.№ 81. Тираж 100.

Институт океанологии им.П.П.Ширшова Академии наук СССР
Москва, ул.Красикова, дом 23.